

해안 도시폐기물 매립지의 침출수 이동 특성 및 부식성
The characteristics of leachate migration and corrosivity
in municipal wastefills at seaside

장연수¹, 정하익¹, 김진만²

A b s t r a c t

Recently, waste landfills built on seashores have been increased because of the easy availability of broad area near the urban communities. To evaluate the performance of the marine clay landfill liner numerical contaminant transport analyses are performed by selecting the typical section of a waste landfill built on seashores and using hydraulic conductivity data obtained from the site. Also, the laboratory electrical resistivity test and the in-situ corrosion test are performed in order to analyze the influence of the soil and leachates composing the landfills on the construction materials.

From the results of contaminant transport analyses, it is shown that the leachates can be migrated faster through narrow pervious channels than the wide homogeneous pervious medium and the importance of good quality barriers to prevent the contaminant migration is recognized. In the laboratory electrical resistivity test all the earth materials except the cover soils saturated with distilled water have small resistivities, which shows a high potential of corrosivity of soils composing landfills. However, the degree of corrosion of specimens buried in the landfills was not so severe except the zinc and carbon steel specimens. This apparently conflict results present the necessity of the investigation of other major factors and the long term in-situ corrosion test.

-
1. 한국건설기술연구원 지반연구실, 선임연구원
 2. 한국건설기술연구원 지반연구실, 연구원

1. 서 론

산업발달의 가속화와 인구증가로 말미암아 부수적으로 발생하는 도시폐기물의 증가로 인하여 이를 처리하기 위한 매립장이 매년 증가하고 있는 추세에 있다. 국토가 협소한 우리나라의 경우 내륙지방에 대단위로 매립장을 건설할 부지가 거의 없으므로 광역의 부지를 도심지 근처에서 쉽게 얻을 수 있는 해안지역에 매립장을 건설하는 경향이 증가하고 있다.

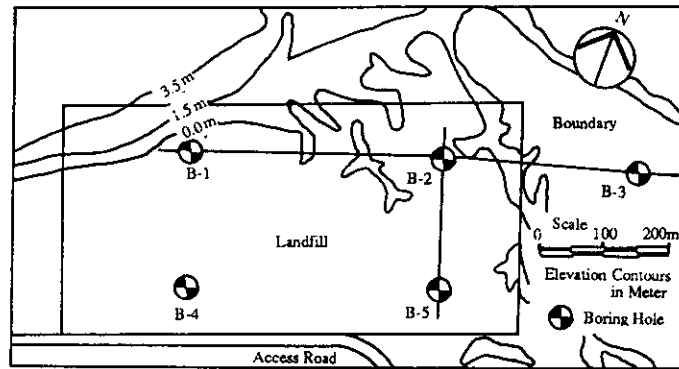
현재 새롭게 조성되고 있는 폐기물 매립지는 과거의 Open dumping 형태의 매립에 비교하여 개선되었으나 해안 점토의 차수성을 이용하여 별도의 바닥 차수시설을 하지 않은 채 매립을 실시하고 있다. 이러한 경우 지반 투수성의 비균질함으로 인하여 오염수 이동이 국부적으로 이루어져 주변지반으로 누출될 가능성이 상존하고 있다. 본 고에서는 이러한 해안매립지 기초지반을 통한 침출수 이동 특성을 현재 시공되어진 해안 폐기물 매립지의 성토단면에 대하여 수치해석 오염모델을 이용하여 분석함으로써 해안 점토지반의 매립장 바닥라이너 재료로서의 적합성을 알아 보았다.

한편, 폐기물 매립지를 건설부지로의 활용에 대한 관심이 고조되고 있음에도 그 지반에 매설될 건설자재, 즉 강말뚝, 파이프, 콘크리트 등의 매립된 폐기물과 침출수에 의한 부식의 연구사례는 많지 않다. 본 고에서는 도시폐기물 매립지를 건설부지로 활용할 경우에 대비하여 부식현상에 영향을 미치는 요소 검토와 폐기물 매립장 구성토에 대한 실내 전기저항실험, 실험시편의 현장 매설을 통한 도시폐기물 매립장 내에서의 부식 정도를 검토하고자 하였다.

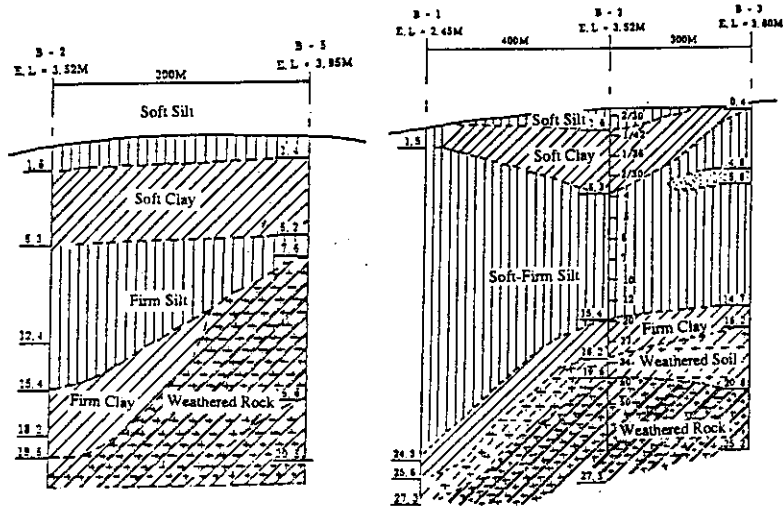
2. 현장개요

본 침출수 이동성과 부식특성 분석의 대상이 된 현장은 서울에서 서쪽으로 40km 떨어진 약 8 만평 규모의 매립장으로서 폐기물 매립이 1990년 2월에 매립이 시작되어 1991년 12월에 완료되기로 하였으나 이를 대체 할 수 있는 매립장 부지 매입의 어려움으로 인해 현재도 매립이 수행되고 있는 곳이다. 매립장 지반을 그림 1(a)와 같이 시추조사한 결과로부터 구성한 토질주상도를 그림 1(b)에 보였는데 그림에서 보는 바와 같이 매립장 기초지반은 실트와 점토, 화강토로 구성되어

있으며 흙의 종류와 두께가 지점별로 현저하게 변화하고 있음을 보여준다. 매립장 바다의 침출수 집수시설은 준호기성 방식으로 P.V.C 유공관과 주변에 자갈 필터층을 설치하여 자연 순환방식으로 외부 공기와 접할 수 있게 시설하였으며 쓰레기 매립장의 내부지반 조성은 침출수 집수관로 계획에 따라 침출수 증계 펌프장까지 자연유하가 가능하도록 관로경사를 고려하여 내부지반의 종단구배를 0.4%, 횡단구배를 0.4~0.6%의 경사를 주었다(그림 2).



(a) Boring plan of the landfill site



(b) Soil profiles through boring holes in two directions.

Fig.1 Details of boring plan and the soil profiles

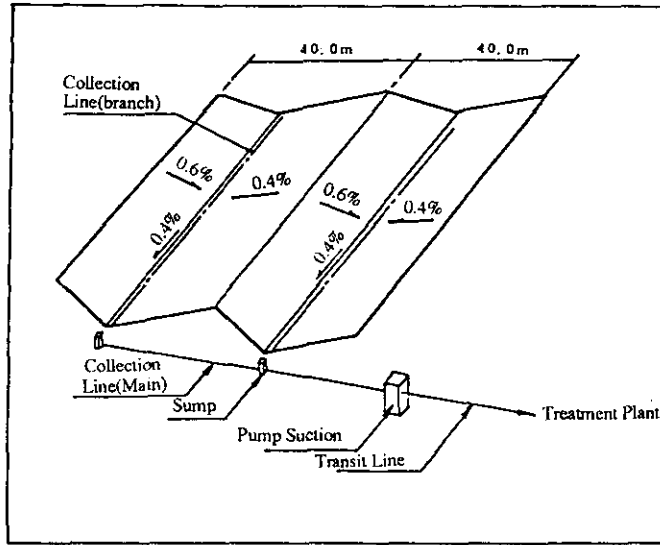
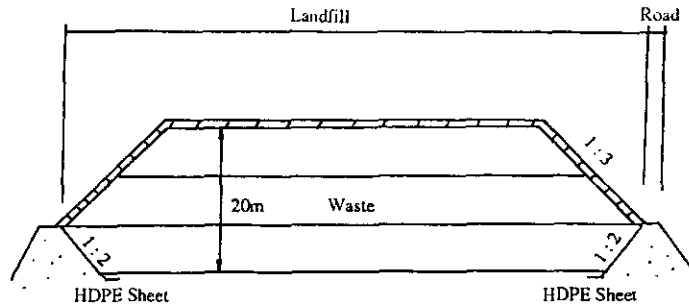


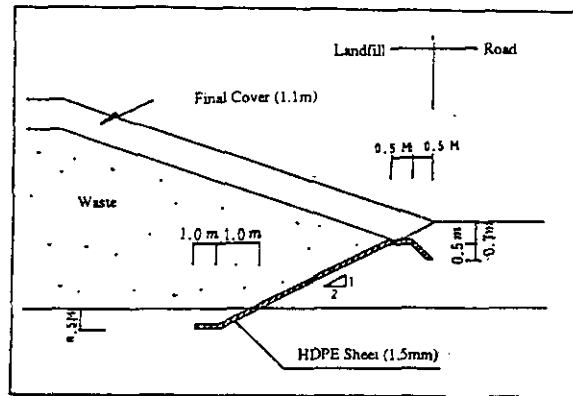
Fig. 2 Drainage scheme at the bottom of the landfill

라이너시스템은 투수시험결과 지반의 투수계수가 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로서 불투수층을 이루며 장래 쓰레기 매립하중에 의한 압밀효과에 따라 투수성이 저하될 것으로 가정하여 원지반을 그대로 사용하고 있으며, 매립장 내부의 법면부는 제체성토시 재료문제와 함수비 관리의 곤란으로 다짐이 불량하게 되어 쓰레기층에서 발생한 침출수의 차수 및 해수의 침입을 방지하기 위하여 1.5mm 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)을 제방기초 지반에 0.5 m 정도 삽입하여 제체 법면부에 설치하고 있다. 그림 3에는 매립장의 표준단면과 법면부의 HDPE 지오멤브레인 설치 방식을 보여준다.

현장의 라이너를 구성하고 있는 흙의 특성은 표 1과 같다. 대체로 소성이 적은 실트 및 점토로 구성되어 있고, #200체 통과량이 95 % 이상이나 점토물은 20 % 정도로 나타나 있다. 라이너지반의 점착력은 높은 편이지만 마찰력이 적고 SPT의 N치가 4보다 적게 나타나 매우 연약한 지반임을 알 수 있다. 라이너재료의 투수계수는 입도분포와 실험실의 변수위 투수시험으로부터 구하였는데 입도분포로부터 구한 투수계수는 10^{-6}cm/sec , 투수시험으로부터 구한 값은 $9.42 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이었다. 지표부근에 있는 흙에 대해서는 별도의 현장 slug 시험에 의하여 투수계수를 구하였으며 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ 의 값을 보였다.



(a) Typical section



(b) Configuration of HDPE geomembrane

Fig. 3 Typical section of the landfill and the configuration of HDPE geomembrane.

Table 1. Physical and engineering characteristics of the natural marine clay liner.

Soil Parameter	Value
Specific gravity	2.64 ~ 2.68
Unit weight(KN/m ³)	17.4 ~ 17.8
Void ratio	1.02 ~ 1.13
Soil classification(ASTM)	ML ~ CL
Percent passing No. 200 sieve	> 95
Percent of clay particles	20
Liquid limit(W _L)	33.4 ~ 41.5
Plasticity index(I _p)	11.2 ~ 19.0
Cohesion(KN/m ²)	19.6 ~ 35.28
Friction angle(°)	2 ~ 6
SPT(N)	< 4
Compression index	0.235 avg.

3. 매립장 기초지반을 통한 오염수이동

매립장 바닥을 구성하고 있는 라이너지반은 구성흙의 비균질한 투수특성, 연약 지반의 creep 발생과 배수 유공 pipe의 막힘으로 인한 배수시설의 손괴로 인하여 장기적으로 보아 주변지반으로의 오염수 누출이 예상된다. 이러한 경우의 대책하부의 기초 지반을 통한 오염 거동을 본 매립지 기초지반의 투수계수 크기화 그 분포, 그리고 매립장내의 수두를 변화시켜가면서 알아보았다. 그리고 오염 농도의 제체지반 중앙과 제체 선단부에서의 시간경과 및 오염원 지속시간에 따른 민감도를 검토하였다.

3.1 오염물질의 이동 이론

절토라이너를 통한 오염물질의 이동을 흡속을 통한 주요 이동 메카니즘인 Advection과 Dispersion으로 표현될 수 있으며 다음과 같은 방정식으로 나타내어진다.

$$\text{div} (D \text{ grad} C - C\bar{V}) = \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

상기식에서 C는 오염물질의 농도, D는 분산계수 그리고 \bar{V} 는 라이너를 통한 물의 평균 선형속도(average linear velocity)를 나타낸다. Advection에 의한 오염이동은 물의 평균 선형속도에 의존하고 오염물의 분산되는 정도는 다음과 같은 2가지 요소로 구성되는 분산계수에 의한다.

$$D = D^* + D_m \quad (2)$$

여기에서 D^* 는 흡속을 통한 오염이동물질의 유효 확산계수로서 오염성분의 분자의 활동성인 Brownian motion에 의한 확산을 나타내며 D_m 은 수리동력분산계수(hydrodynamic dispersion coefficient)로서 흙의 다공질 매체를 흐르는 물의 미세한 흐름에 의해 확산되는 정도를 나타낸다. 또한 수리동력 분산계수는 흡속으로의 물의 흐름(\bar{V})에 비례한다고 가정하여 $D_m = \alpha \bar{V}$ 로 표시하고 상수 α 는 분산지수(dispersivity)라고 부른다. 라이너를 통한 물의 흐름은 Darcy 법칙에 의

하여

$$\bar{V} = \begin{Bmatrix} \bar{V}_x \\ \bar{V}_y \end{Bmatrix} = \frac{K}{n} \begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

로 표시되며 \bar{V}_x 와 \bar{V}_y 는 평균선형속도의 X와 Y 방향 성분이며 n는 간극률, h는 수리수두를 나타낸다. 정상상태의 2차원 수리수두 분포는 (4)식과 같은 Laplace 방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial Y^2} = 0 \quad (4)$$

식 (1)과 (3), (4)는 Galerkin의 방법에 의한 Jang et al. (1990)에 의해 개발된 유한요소 오염이동모델을 이용하여 수리수두 분포와 시간에 따라 이동된 오염수 농도 분포를 구하였다.

3.2 입력 데이터의 구성

본 해석에서의 투수계수는 구성지반이 실트질 점토로 넓게 분포되어 있으며 극부적으로 산재하는 모래 및 화강토층의 영향을 감안하여 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/sec의 범위에 있다고 가정하고 라이너층에서의 오염물질의 거동을 예측하였다. 라이너에 미칠 수리수두는 매립지내의 지하수위면의 불확실성을 고려하여 가제방의 높이와 같은 4m와 최종 매립지반고와 가제방 높이의 중간 값인 8m로 가정하였다.

현장에서의 계측자료가 없는 매립 폐기물의 흡수에서의 유효확산계수 (Effective diffusion coefficient)는 매립물의 성상에 따라 큰 변화가 없으므로 6×10^{-6} cm²/sec로 Goodal and Quigley (1977)로 부터 인용하였으며 분산지수는 0.5 m, 공극률은 0.3으로 가정하여 사용하였다.

3.3 해석 모델의 작성

해석대상지역의 지반은 상기한 바와같이 자연 실트 및 점토층으로 구성되었으며 가제방을 통한 오염수와 해수의 침입을 방지하기위해 지오멤브레인을 경사면에 설치하였다. 지오멤브레인의 설치영역과 제체의 규모는 그림 4와 같으며 가제방 기초지반으로의 오염이동을 방지하기 위하여는 특별한 차수시설을 하지 않았다. 비균질성의 토질의 성질을 포함한 기반 흙과 매립물의 특성이 제체 하부토의 오염물질이동에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음과 같은 2가지의 예제를 구성하였다.

Case A의 경우는 그림 4의 Area 1, 2 가 동일한 투수계수 값을 갖는 것으로 가정하고 투수계수의 값을 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/sec, 매립재내의 경계 수리수두를 4 m, 8 m로 바꾸어가면서 해석하였다.

Case B의 경우는 Area 1과 2가 다른 투수계수 값을 가지며 상부층이 투수계수가 높을 때 (상부 $K_1=10^{-5}$ cm/sec, 하부 $K_2=10^{-7}$ cm/sec)와 투수계수가 낮을 때 (상부 $K_1=10^{-7}$ cm/sec, 하부 $K_2=10^{-5}$ cm/sec)인 경우로 구성하였다. Case B의 경우는 라이너 지표면이 건조현상(desiccation) 등으로 인하여 투수계수가 커지는 경우와 지질형성시 윗부분에 점토성분이 집중 분포되는 경우를 가정하여 구성하였으며 각각의 경우에 대하여 매립지내 경계수두를 4 m와 8 m로 바꾸어가며 오염이동 분포를 구하였다.

그림 4 의 A점과 B지점은 제방의 기초 중앙지점과 제방하부의 끝부분으로서 시간에 따른 그리고 경계수두의 변화에 따른 농도의 변화를 알아보기 위해 선정하였다. 가제방의 상부에는 오염농도 1.0의 오염원이있고 가제방의 하부경사 끝에서 20m 떨어진 지점에는 지표수가 있어 스며나온 오염물질이 지표수에 의하여 씻겨져서 오염 농도가 영이 되는 것으로 가정하였다.

Case A의 문제로 제기된 사항은 다음과 같다.

- (1) 매립층으로부터 라이너로 오염물질이 스며들어 제방하부로 이동할 때 투수계수(hydraulic conductivity)의 변화에 의해 30년 동안 오염물질이 이동하는 거리는 ?(이때의 수리수두는 제방 경사의 높이와 같은 $h = 4m$, 그리고 오염물은 비반응성 물질로 가정)
- (2) 라이너의 투수계수 안전축인 $K = 10^{-5}$ cm/s로 가정하였을때 수리수두의 높이의 변화에 의한 오염물질의 이동거리는 ?

(3) 매립장의 오염물이 시간이 경과된 어느시점에서는 없어진다고 가정할 때
오염원의 지속기간을 5년, 10년, 20년으로 본 가제방 중심선 지하하부
2m 지점에서의 시간에 따른 오염물의 농도 변화는 ?

Case B의 경우는 (1)번의 경우에 대하여 해석하여 오염물 이동상황을 살펴보고
가제방 하부경사 끝 B 지점의 오염물 농도변화를 구하였다.

이 문제를 해석하기 위한 유한요소망은 그림 5와 같이 작성하였다. 유한요소
망에는 체체 내로의 오염물질 이동은 포함되지 않았으며 기초지반으로의 이동효과
와 기초지반에 포함된 지오멤브레인의 영향을 포함시키고자 하였다.

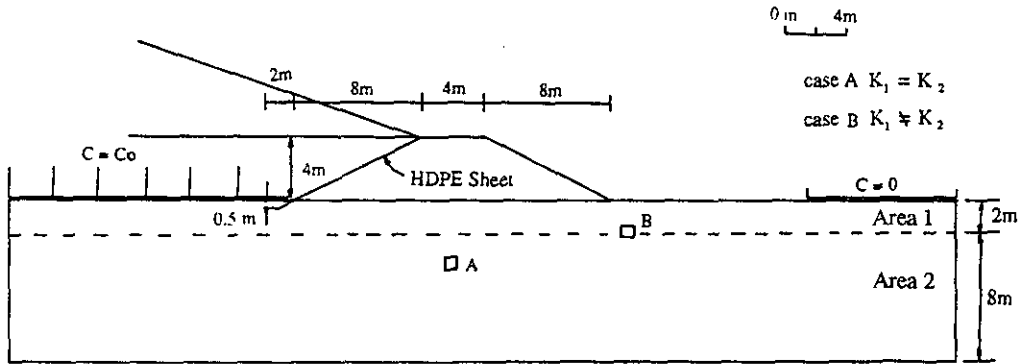


Fig. 4 Schematic profile of the landfill and the embankment used for the leachate transport analysis.

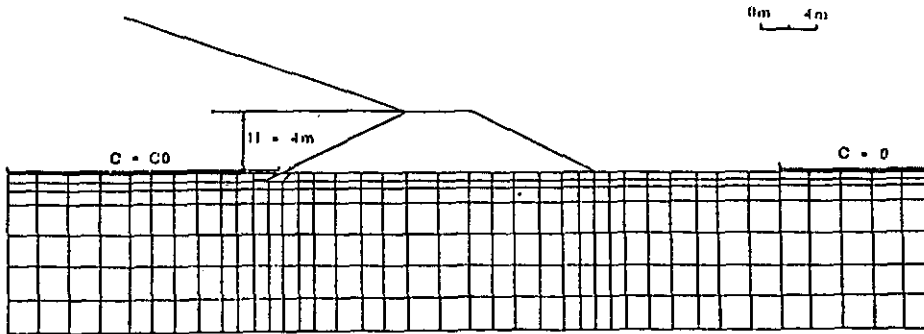


Fig. 5 Finite element mesh used for the leachate transport analysis.

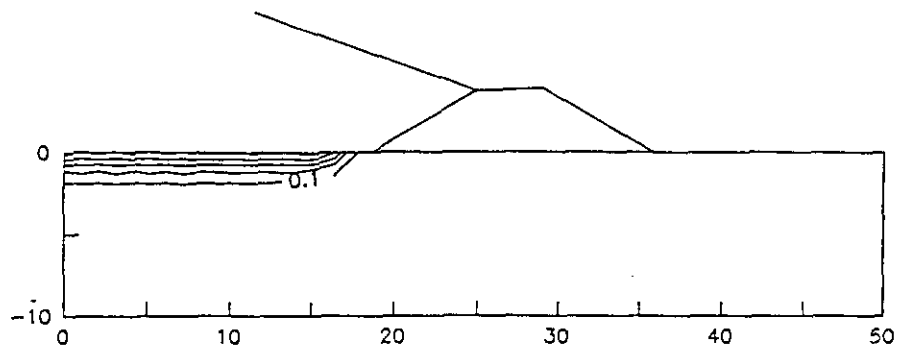
3.4 해석 결과

균질한 지반에 대한(Case A) 투수계수의 변화에 대한 오염물질의 30년동안 이동한 모습을 그림 6에 보였는데 본문제에서 오염물질 이동시간을 30년으로 지정한 것은 미국 EPA의 점토라이너를 통한 오염수의 새어나감을 방지하고자 하는 방지기간에 맞추어 해석하고자 하였기 때문이다. 투수계수가 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec에서는 라이너의 깊이 부분을 향하여 2~3 m의 오염이동이 있었을 뿐 가제방의 기초지반을 통한 이동은 거의 없었는데 이는 투수계수가 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec영역에서는 라이너내로의 지하수의 흐름의 영향 보다는 유효확산계수(effective molecular diffusion)에 의한 영향이 많이 작용하였기 때문이다. 그러나 $K=10^{-5}$ cm/sec에서의 오염물질은 30년동안 오염원으로부터 20 m 가량을 이동하였다. 세 경우 모두 기초지반내로 묻혀 있는 지오멤브레인이 기초지반 내로 이동하는 오염물에 대한 차수효과는 없는 것을 보여준다.

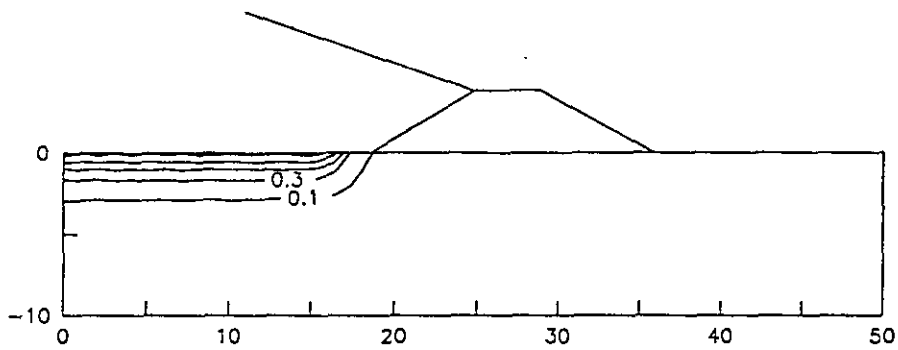
그림 7에는 수리수두 4 m와 8 m에 대한 $K=10^{-5}$ cm/sec에서의 이동을 표시한 것인데 $h=8$ m에서는 오염물질이 제방기초지반을 통해 하부의 상당한 부분까지 이동을 보여준다. 그림 7의 농도 등고선 0.1의 경우는 지표에 있는 지표수로 오염물질이 흘러가 농도가 영이 되는 경계조건의 영향이 반영된 것이다. 본 매립지반의 비균질성과 폐기물 매립지의 지하수위면의 불확실성을 감안할 때 이러한 극한 상황을 고려하여 제방 및 라이너의 설계 및 시공에 반영되어야 되리라고 생각된다.

그림 8에는 오염원의 지속기간을 10년으로 가정한 오염물질의 $K = 10^{-5}$ cm/sec, $h=4$ m에서의 30년 동안의 이동상황을 보인것인데 30년 후 오염원 부분에서의 농도가 오염원의 0.3배로 감소하고 있으며 오염물질의 이동거리에는 지속 기간이 30년인 오염원의 경우에 비해 별 차이가 없었음을 알 수 있다.

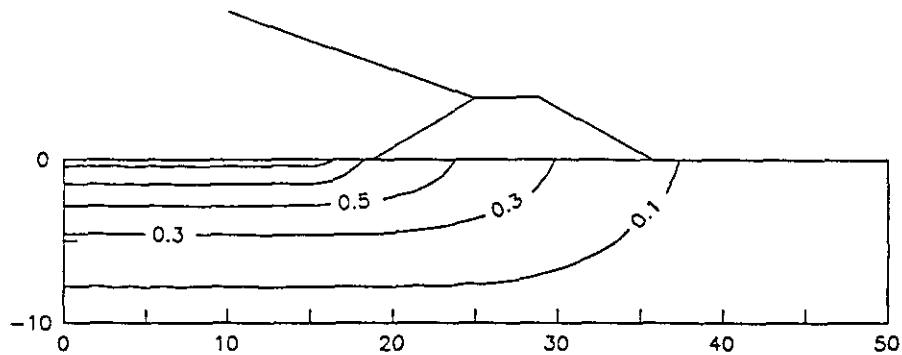
그림 9에는 제방하부 A지점에서 오염원 지속기간 5, 10, 20년에 대비한 오염농도의 변화를 보여주는데 매립장 설치후 5년 후 부터 농도가 감지되기 시작하여 이후 25년 동안 계속 증가하였는데 예측되는 비화 같이 오염원 지속기간의 증가에 따라 제방 지반 중심에서의 농도도 증가하고 있음을 알 수 있다.



a) $K = 10^{-7}$ cm/sec



b) $K = 10^{-6}$ cm/sec



c) $K = 10^{-5}$ cm/sec

Fig. 6 Contours of normalized concentration (C/C_0) with varying hydraulic conductivities (i.e. $10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}$ cm/sec) after 30 years.

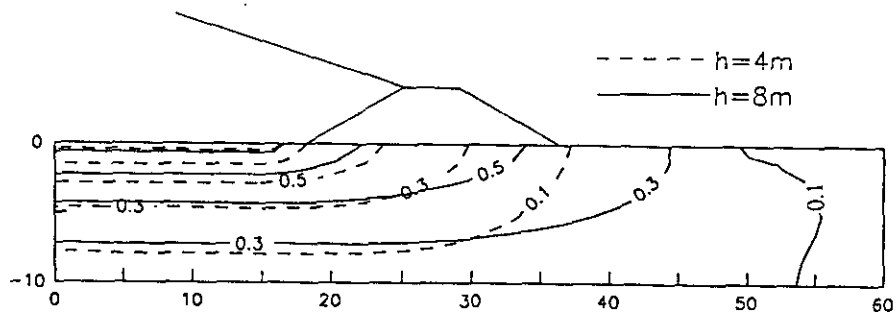


Fig. 7 Contours of normalized concentration(C/C_0) with two different hydraulic heads after 30 years

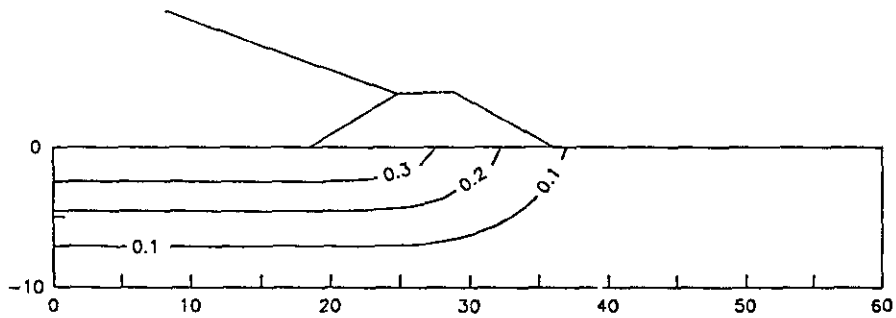


Fig. 8 Contours of normalized concentration(C/C_0) with the duration of contaminant source, 10 years.

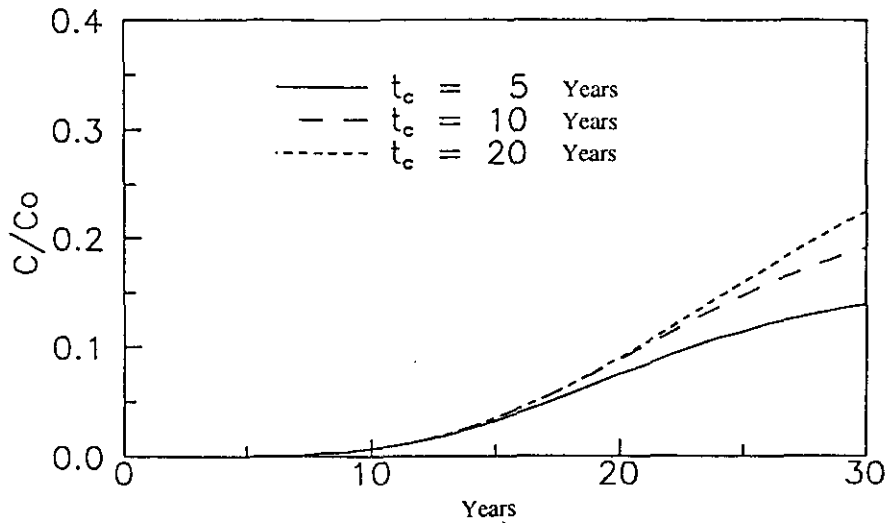


Fig. 9 Changes of nomalized concentration at the point beneath the embankment with the duration of contaminant source, 5, 10, 20 years.

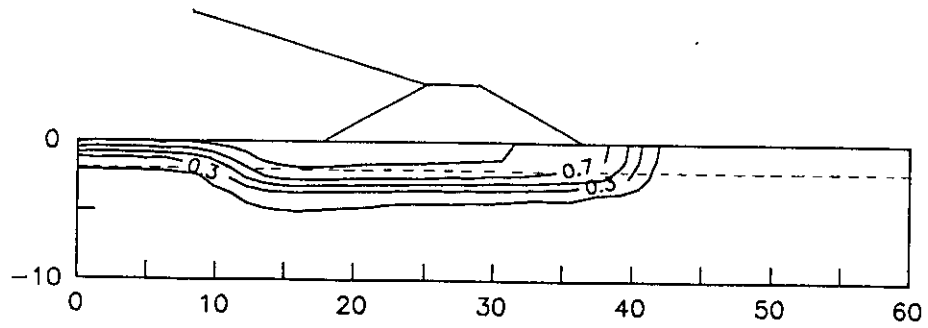
그림 10, 11은 Case B의 경우로서 오염원의 지속기간인 30년 동안 오염물질의 이동 상황을 보인 것으로서 그림 10(a), (b)는 상부지반의 투수계수 $K=10^{-5}$ cm/sec, 하부지반의 투수계수 $K=10^{-7}$ cm/sec 일 때 수리수두가 4 m, 8 m인 경우를 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 상부지반이 상대적으로 투수계수가 클 경우 오염물질이 제방기초 하부지반을 통하여 오염원으로부터 길이방향으로 약 25 m 정도 이동하여 제방 바깥으로 매우 큰 농도의 침출수가 흘러나가고 있음을 볼 수 있다. 수리수두가 4 m인 경우와 8 m인 경우를 비교하여 보면 전지반이 균질한 경우에 비해(그림 7) 침출수 이동성에 수리수두의 크기가 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그림 11(a)(b)는 상부지반 투수계수 $K=10^{-7}$ cm/sec, 하부지반 투수계수 $K=10^{-5}$ cm/sec 이며 수리수두가 4 m, 8 m로 변비침균크 자관채 침출수 농도분포를 보인 것으로서 상부면에 잘 다짐된 점토라이너층이 2 m 정도 포설되어진 경우로 상정해 볼 수 있다. 그림에 보여진 바와 같이 상대적으로 불투수인 상부 지층에서의 침출수가 advection이 아닌 확산현상으로만 이동하여 30년 동안의 이동거리가 크지 않음을 알 수 있으며 불투수 상부지층을 통과한 후에는 $K=10^{-5}$ cm/sec인 부분에서는 오염물의 이동속도가 빨라짐을 알 수 있다. 이 경우 수리수두의 차이는 불투수

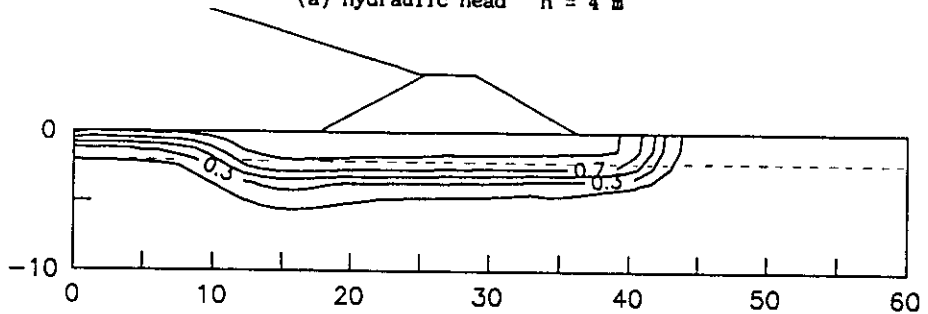
상부층의 오염물 이동에는 큰 영향이 없으나 하부 투수층 침출수가 접촉되면서 빠른 지하수층의 흐름속도로 인하여 이동성의 차이가 현저하여 짐을 알 수 있다.

그림 12에는 투수계수 $K=10^{-5}$ cm/sec 로 균질하게 형성된 지반과 상부지반 투수계수 $K=10^{-7}$ cm/sec 로 비균질한 지반에서의 30년 동안 침출수가 이동한 모습을 비교하였다. 흔히 예상할 경우 전체적으로 균질하게 투수계수가 높은 경우 주변 지반으로의 오염이동 정도가 심할 것으로 생각하기 쉬우나 그림에서 본 바에 의하면 투수성의 지반이 상부지층에만 집중하여 분포할 경우 제체 기초지반을 통한 오염물 이동농도화 속도가 훨씬 큰 것을 보여 주어 폐기물과 접하고 있는 라이너지반의 차수막 설치 및 개량이 얼마나 중요한가를 알려주고 있다. 본 비교에 의하면 균질하게 투수성이 클 경우에는 가시적이지는 않으나 지하수 층의 오염이 심하여 질 것이며 상부층만이 비균질하게 투수성이 클 경우에는 지표수 오염이 초래되면서 그 오염되는 모습이 가시화 될 것이다.

그림 13은 수리수두 4 m와 8 m에서의 상부 지층이 투수 또는 불투수층으로 형성된 경우의 계방하부 경사 끝지점(B지점)에서의 오염물질 농도변화를 보여 주는 것으로 수두가 높을수록 그리고 상부지반이 투수성인 경우가 불투수성인 경우에 비하여 농도가 크게 나타남을 알 수 있으며, 시간의 변화에 따라 증가됨을 알 수 있다. 반면 상부에 불투수성 지층이 형성된 경우에는 관심 지점의 오염되는 정도가 미미함을 알 수 있다.

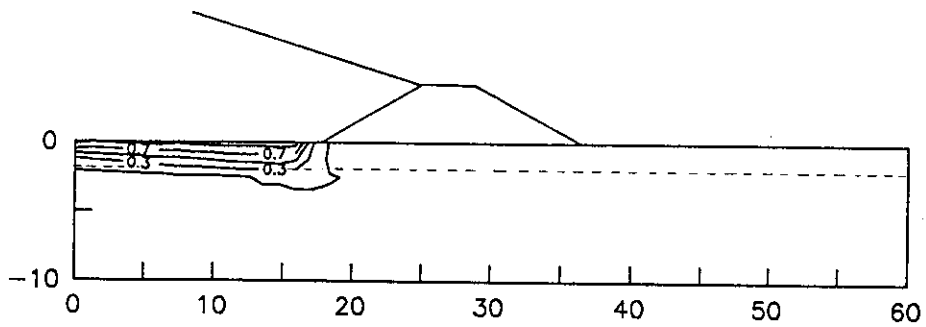


(a) hydraulic head $h = 4 \text{ m}$



(b) hydraulic head $h = 8 \text{ m}$

Fig. 10 Contours of normalized concentration in heterogeneous medium
($K_1 = 10^{-5}$, $K_2 = 10^{-7}$ cm/sec)



(a) hydraulic head $h = 4 \text{ m}$

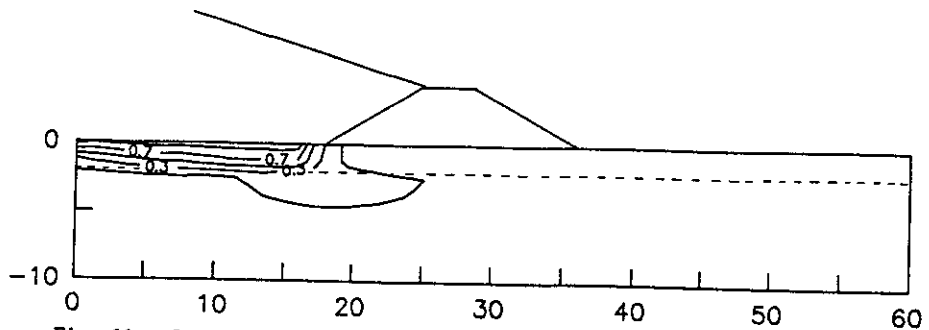


Fig. 11 Contours of normalized concentration in heterogeneous medium
($K_1 = 10^{-7}$, $K_2 = 10^{-5}$ cm/sec)

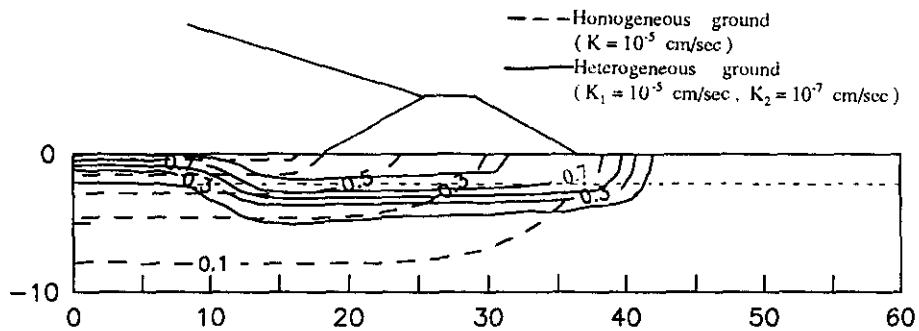


Fig. 12 Comparison of normalized concentration contours between the homogeneous and heterogeneous medium ($h=4$ m)

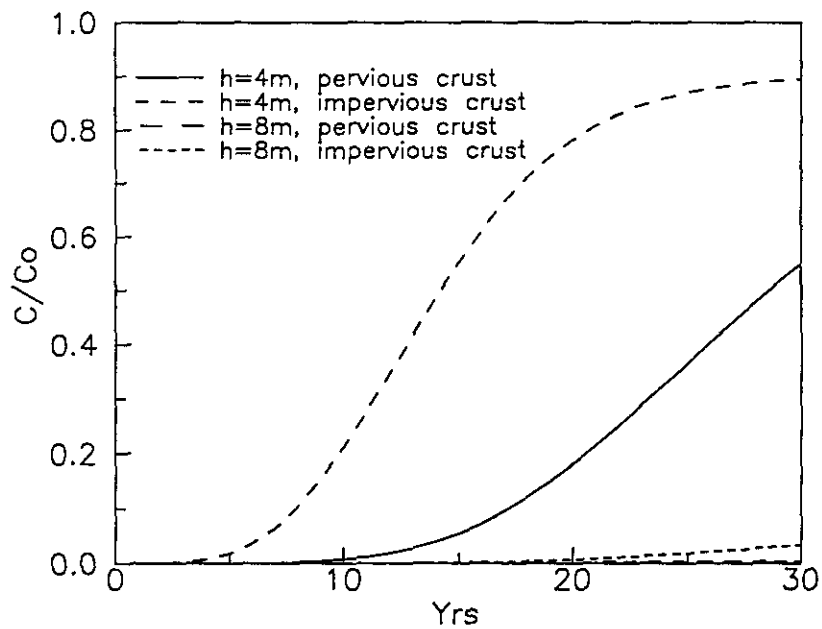


Fig. 13. Changes of normalized concentration at the toe of the embankment (point B) with respect to two hydraulic heads

4. 폐기물 매립물질에 의한 건설자재의 부식성

쓰레기 매립지층 내에 매설되는 건설재료나 구조물은 일반지층과는 달리 오염물질에 의해 부식의 영향을 크게 받을 것이다. 이와같은 부식의 영향을 측정하기 위해서 일반적으로 실내시험이나 현장시험을 실시하게 되었다. 본 절에서는 먼저 지중내 부식에 영향을 미치는 요소를 파악하고 부식의 여러 인자 중 비교적 영향이 큰 고유저항치로부터 매립장의 지반, 매립 쓰레기층, 복토층의 각 요소별로 건설자재에 미칠 부식 잠재력을 알아보고, 현장시험으로는 매립장에 부식시험용 시편을 직접 매설하여 실제의 부식정도를 알아보았다.

4.1 흙속에서의 부식의 영향 요소

흙에 있어서의 부식의 주된 영향요소로는 (1) 간극률(porosity), (2) pH, (3) 전기전도도 또는 저항도, (4) 습도, (5) 용해된 염의 종류 및 농도 등이다. 이러한 요소들은 흙속에서의 금속의 부식에 다음과 같은 영향을 미치게 된다(Uhlig and Revie, 1985).

간극률(porosity)

간극률이 커서 통기성이 좋은 흙에서의 부식 생성물은 간극률이 작은 흙에서의 부식 생성물 보다 더 금속을 보호하는데 이는 간극률이 작은 흙에서의 부식은 천공(pitting) 형식으로 일어나 균일한 형태로 산화막을 형성하는 경우보다 금속에 나쁜 요소로 작용하기 때문이다.

간극률이 큰 흙에서의 천공(pitting)의 정도는 초기에는 크나 산소의 충분한 공급과 금속 주위의 수산화 철막의 형성으로 인해 시간이 지남에 따라 급격히 감소하며 이러한 보호막의 형성은 시간에 따른 천공의 정도를 감소시킨다. 반면에 간극률이 작은 흙에서는 초기 피팅 정도는 작지만 비산화 상태로 남아있으므로 부식생성물은 흙으로 확산되어 없어져서 부식 철금속에 대한 보호막을 형성하지 못한다. 또한 흙의 통기성은 산화보호막의 형성 뿐만 아니라 흙속에 극부전지를 일으키는 유기 배위물(organic complexing agents)과 비분극성 물질(depolarizer)들의 농도를 산화를 통하여 줄이게 된다.

pH

일반적으로 금속의 산화물이나 수산화물은 염기성이기 때문에 산에는 녹기 쉬우나 알칼리에는 녹기 어려우며 따라서 부식액의 수소이온 농도(pH)에 따라 부식속도는 달라진다. pH 4~10의 영역에서 부식률은 pH의 영향을 받지 않고 오직 산소가 금속표면으로부터 확산하여 없어지는 정도에 의존한다. 산화영역(pH < 4)에서는 산화 철 막이 금속표면에서 녹아 없어지므로 금속은 비배수의 지반환경과 직접접촉하게 되어 부식이 빨라지며 부식반응물은 수화정도(hydrogen evolution)와 산소의 비분극화 정도의 합이다. 산화영역이 pH 10을 넘을 때에는 알칼리화 녹아있는 산소로 인하여 철금속은 수동상태가 되고 따라서 부식율이 줄어들게 된다. 반면에 알루미늄의 경우에는 pH < 4 또는 pH > 10에서는 부식속도가 빠르며 pH 4~10 범위에서는 거의 없는데 이는 알루미늄의 수산화물이 산이나 알칼리에 녹는 양성 화합물이기 때문이다.

흙속 유기물질로부터 발생하는 유기산을 포함하는 흙은 철, 아연, 납 구리 등을 크게 부식시키며 이러한 흙의 전체산도(total acidity)는 pH와 함께 부식성의 정도측정에 좋은 지수가 될 수 있다. 비배수지역에서 NaCl이나 Na₂SO₄의 농도가 높을 경우 흙의 부식성은 높다.

전기 전도도 및 습도

전기 전도도가 높을 경우는 다른 흙의 성분이나 금속표면의 비균질성에 의해 형성된 국부 전류에 의해 부식에 많은 영향을 미친다. 습도가 낮거나 용해된 염이 적어서 전도도가 낮은 흙은 부식성이 크지 않다. 전기 전도도와 함께 흙의 양·음극 분극성은 부식성에 대한 중요한 지표가 되며 흙의 고유저항치(electric resistivity)가 2000 Ω·cm 이하일 경우 부식성이 큰 것으로 알려져 있다.

표 2에는 여러 연구자들이 제안한 부식정도와 고유저항치와의 관계를 보여준다.

Table 2. The relationship between electric resistivity and corrosivity(Lee, 1991).

Electric resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)					
Corrosivity	Palmer	Applegate	Waters Evans	Pritula Peabody Tomashow	Romanoff
very large	< 1,000	< 1,000	< 900	< 500	< 700
large	1,000~2,000	1,000~5,000	900~2,300	500~1,000	700~2,000
middle	2,000~5,000	5,000~10,000	2,300~5,000	1,000~2,000	2,000~5,000
small	5,000~10,000	10,000~100,000	5,000~10,000	2,000~10,000	> 5,000
very small	> 10,000	> 100,000	> 10,000	> 10,000	

많은 연구결과 고유저항치가 1,000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 이하에서는 대부분 고유저항치에 의해서 부식정도가 결정되고, 고유저항치가 1,000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 이상에서는 다른 부식요소의 영향을 많이 받는다고 보고되어 있다. 고유저항치 다음으로 부식에 큰 영향을 주는 인자로는 함수비를 들 수 있으며, 보통은 함수비가 25~35% 일 때 부식정도가 가장 높고, 25% 미만이나 35% 이상에서는 부식정도가 감소된다.

용해염(Dissolved Salts)

해수에 최대 3%까지 NaCl이 포함될 경우 부식도는 증가하지만 산소의 수증기의 용해도가 NaCl의 농도증가에 따라 감소하므로 높은 염도에서는 오히려 부식정도가 감소한다. 알칼리-금속염은 NaCl과 같은 방식으로 철금속을 부식시키며 낮은 농도의 염소나 황(0.1~0.2N)에 의한 부식성이 높고 질소에 의한 부식성은 Cl 이나 S 보다 덜하다. 수화하여 산용액을 형성하는 산염(acid salts)도 같은 pH를 같은 산들과 같은 정도의 부식을 일으키는데 암모니아산(NH₄Cl)은 산이면서도 동일한 pH의 다른 산보다 높은 부식률을 보인다. 이러한 증가된 부식률은 철이온은 배위(complex)할 수 있는 NH₄의 능력 때문이며 높은 농도의(NH₄NO₃)는 Cl나 S에 비하여 부식력이 강한데 이는 비분극 작용을 하는 NO₃의 작용 때문이다(Uhlig and Revie, 1985).

수화하여 pH > 10의 용액을 형성하는 알칼리 염. 예를 들어 Na₃PO₄, Na₂O, Na₂SiO₃, Na₂CO₃ 등은 부식 방지제로서 작용한다. 이들은 녹아있는 산소에 의하

여 철을 수동상태로 하게 할뿐아니라 철과 작용하여 부식액을 생성하여 더이상의 부식을 방지하는 막으로 작용한다. 자연수(自然水)중에는 Mg나 Ca를 많이 포함하고 있는 경우가 연수보다 부식성이 덜한데 이는 금속표면에 CaCO_3 등의 얇은 막을 형성하기 때문이다.

4.2 실내 전기저항시험

앞절에서 언급한 바와 같이 부식에 영향을 미치는 토양내의 요소들은 여러가지가 있으며 금속재료 자체의 물리·화학적 성질을 제외하면 기온, 일조 등의 기상 조건이나 금속이 매설조건에 따라서 그 영향정도가 달라진다.

본 절에서는 매립 완료된 도시폐기물 매립장을 개량하여 토목구조물의 기초지반으로 활용하고자 할 경우 매립층 내에 매설될 매설구조물에 미치는 부식영향을 평가하기 위해 도시폐기물 매립장을 구성하는 쓰레기와 복토재, 침출수와 오랫동안 접촉된 주변 화강토, 기초지반을 구성하는 점토를 채취하여 기본 특성실험을 수행한 후, 부식에 가장 큰 영향을 미치는 각 재료의 전기고유저항치를 평가하는 실내시험을 수행하였다.

실험대상 매립토의 기본특성

실험에 사용된 시료인 현장쓰레기, 복토재, 주변화강토는 침출수 이동해석에 사용된 현장과 동일한 쓰레기 매립장에서 채취하였고, 기초지반 점토의 경우는 그 매립장 근처의 점토층에서 채취하였다. 실험에 사용된 매립재들의 입도분포곡선과 물리적 특성은 그림 14와 표 3에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 복토재와 주변화강토의 입도분포는 비슷한 양상을 보이고 입도의 분포가 넓은 범위에 걸쳐 있으며 점토의 경우는 복토재와 주변화강토 보다 입도가 작은 편이며 분포도 위의 두 재료보다는 좁은 범위에 분포함을 알 수 있다. 표 3에서 보듯이 화강토는 다짐성이 좋은 편이며 쓰레기에 포함된 흙의 액성한계가 가장 높고 다른 흙의 액성한계는 비슷한 값을 보이고 있다.

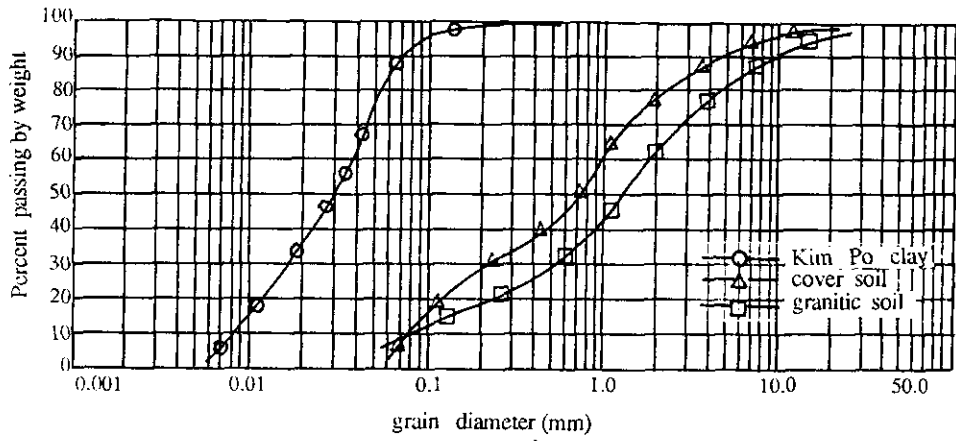


Fig. 14. Grain Size distribution of the soils in the landfill

Table 3 Engineering characteristics of soils used in the electric resistivity test

Material	Grain Size		Compaction		Specific gravity	LL (%)	PL (%)
	Cu	Cg	γ_{dmax}	O.M.C			
Cover soil	12	3	1.74	16.6	2.34	28.85	26.06
Granitic soil	23	3	2.05	17.5	2.63	28.19	19.42
Kimpo clay	5	1	1.73	18.2	2.70	31.00	22.00
In-situ waste	-	-	-	-	-	39.85	26.71

* The Atterberg limits for in-situ wastes are those of the soils contained in the waste

실험장비 및 방법

실험장치는 그림 15와 같이 스테인레스 전극판이 부착된 저항 cell, 저항 10~1,000,000 Ω 을 오차 $\pm 1\%$ 로 측정할 수 있는 Wheatstone bridge 등으로 이루어져 있다. 실험시료는 No.4체를 통과한 시료 5 kg 정도를 채취한 후 현장의 초기함수비 및 최적함수비에 대응하는 다짐폭선상의 건조밀도로 시료를 혼합하여 저항 cell내의 전극판 사이에 3층으로 다짐하여 채운다. 전극판으로 구분된 저항 cell 양단의 격실로부터 증류수 또는 침출수를 부어 4시간 경과 후 고유저항치를 측정하였다.

Wheatstone bridge를 이용한 전기저항측정 실험 후 재료의 고유저항치 ρ_T 를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\rho_T(T^\circ\text{C}) = R_x \cdot A/L(\Omega \cdot \text{cm})$$

$$R_x = R_2 \cdot R_3/R_4(\Omega)$$

- R_x : 측정된 저항값
- R_2, R_3, R_4 : Wheatstone bridge의 저항값
- L : 전극판 사이의 거리(cm)
- A : 시료의 단면적(cm^2)

일반적으로 고유저항치는 30 $^\circ\text{C}$ 일 때를 기준으로 하므로 다음과 같이 온도 보정(ρ_{30})을 하였다.

$$\rho_{30} = \rho_T \cdot (20+T)/50(\Omega \cdot \text{cm})$$

T : 저항 cell 내의 온도

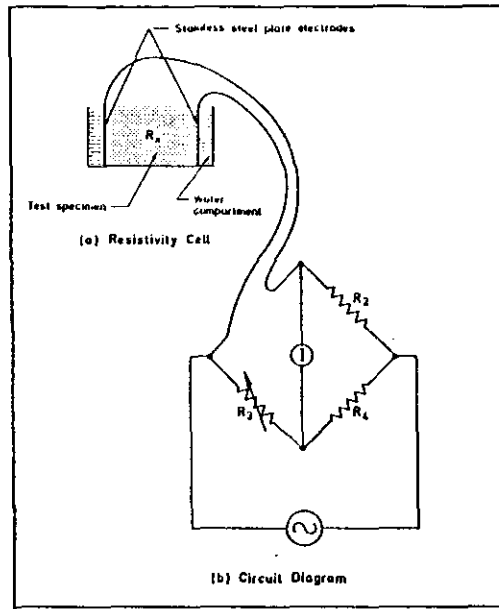


Fig. 15. Schematic circuit diagram for determination of electric resistivity

결과 및 분석

실내 전기저항시험에 의한 각종 매립재들의 고유저항치를 표 2의 여러 제안자들의 값들과 비교하여 부식정도를 평가한 결과는 표 4와 같다.

복토재의 경우 고유저항치가 $3,000 \sim 5,000 \Omega \cdot \text{cm}$ 으로써 부식정도는 보통 정도를 나타내는데 이러한 복토재에 쓰레기에서 침출된 침출수와 혼합하여 실험할 경우 고유저항치가 $600 \sim 750 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 침출수의 혼합이 저항치의 감소에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 침출수에 의한 저항치 감소효과 원인에 대해서는 침출수의 화학성분 분석 등에 의한 확실한 규명이 요구되어진다.

쓰레기 매립장의 침출수에 장기간 노출된 주변화강토의 경우는 고유저항치가 $600 \sim 800 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타났으며 침출수와 같은 유기물과 기타 용해성분을 포함하고 있어 그에 따라 고유저항치가 감소한 것으로 사료된다. 증류수 및 침출수 실험결과를 비교하면 실험변화에 따른 고유저항치 차이가 $20 \sim 130 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 그 차이가 미미한 것으로 나타내는데 이는 화강토 자체가 침출수 속에 장기간 노출되어 있었기 때문에 침출수의 추가가 화강토내의 전해질 용액의 변화에 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

Table 4 The electric resistivity and corrosion potential of various soils in the Landfill

Property	Type	Cover soil		Granitic soil		Kimpo clay		In-situ waste		
		W	W _{opt}	W	W _{opt}	W	W _{opt}	γ _d =0.8 (g/cm ³)	γ _d =1.0 (g/cm ³)	γ _d =1.2 (g/cm ³)
Distilled water	Electric resistivity (Ω · cm)	3452	4736	732	664	288	280	672	574	548
	Corrosion potential	middle	middle	very large	very large	very large	very large	very large	very large	very large
Leachate water	Electric resistivity (Ω · cm)	855	853	713	792	124	333	345	338	359
	Corrosion potential	very large	very large	very large	very large	very large	very large	very large	very large	very large
Water content (%)		16.2	17.9	31.3	17.5	28.0	18.2	24.0		

* W : Remolded at the initial water content

W_{opt} : Remolded at the optimum water content

매립장의 원지반층인 점토의 경우 가장 작은 고유저항치를 나타내는데 이는 점토의 자체 전하로 인한 작은 고유저항치 특성과 해안에 위치함으로서 해수와 접촉하여 형성된 용해성분의 영향인 것으로 사료된다.

현장쓰레기의 고유저항치는 300~700 $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 범위로 역시 작은 고유저항치를 나타낸다. 건조밀도의 증가에 따른 고유저항치 감소율은 중류수 실험시 18.5%로 미미하나 감소하는 경향을 보여 건조밀도의 증감이 토양의 부식성에 기여한 것으로 판단된다. 한편, 중류수와 침출수 사용여부에 따른 고유저항치는 침출수 사용의 경우가 35~49%의 감소를 보여 침출수에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

이상의 결과들을 종합해 보면 쓰레기 매립장의 부식 포텐셜은 고유저항치만으로 평가해 볼 때 큰 것을 알 수 있으며, 침출수에 의한 영향도 무시할 수 없는 것으로 사료된다. 또한 시료의 초기함수비와 최적함수비로 실험하였을 때의 저항치의 변화는 크지 않는 것으로 나타났다. 각 매립재의 함수비를 보면 점토와 주변화강토의 함수비가 부식포텐셜이 큰 영역에 포함되어 있음을 알 수 있다.

4.3 현장매설 부식 시험

건설자재로 사용되는 금속시편과 콘크리트시편을 대상 매립장에 매설한 후 3개월 단위로 파내어 시편의 무게감량과 일축압축강도를 총 1년여에 걸쳐 측정하고 표면상태와 부식 두께 등을 병행하여 조사하였다.

부식시험용 재료

지중에 설치되는 건설재료로는 콘크리트재와 금속재가 거의 대부분을 차지하므로 이를 대상으로 부식시험용 시료를 제작하였다. 표 5에 나타난 바와 같이 콘크리트 재료로는 무근 콘크리트와 철근콘크리트의 2종으로 하였으며 금속재료로는 탄소강, 아연도강, 구리, 스테인레스강, 알루미늄의 5종으로 하였다. 시료의 형태로서 콘크리트 재료는 원형 모듈드로 하였고 금속재료 중에서 구리와 스테인레스강은 봉상으로 하였으며 탄소강, 아연도강 및 알루미늄은 판상으로 하였다.

Table 5. Type and size of the specimens.

Materials	Size(cm)	Remarks
unreinforced concrete	10 (D) x 20 (H)	cured for 28 days
reinforced concrete	10 (D) x 20 (H)	cured for 28 days
copper bar	0.6(D) x 15 (H)	
stainless steel bar	0.6(D) x 15 (H)	D : diameter
aluminum plate	2.5(W) x 15 (H) x 0.6(t)	H : height
carbon steel plate	2.5(W) x 15 (H) x 0.6(t)	W : width
galvanized steel plate	2.5(W) x 15 (H) x 0.6(t)	t : thickness

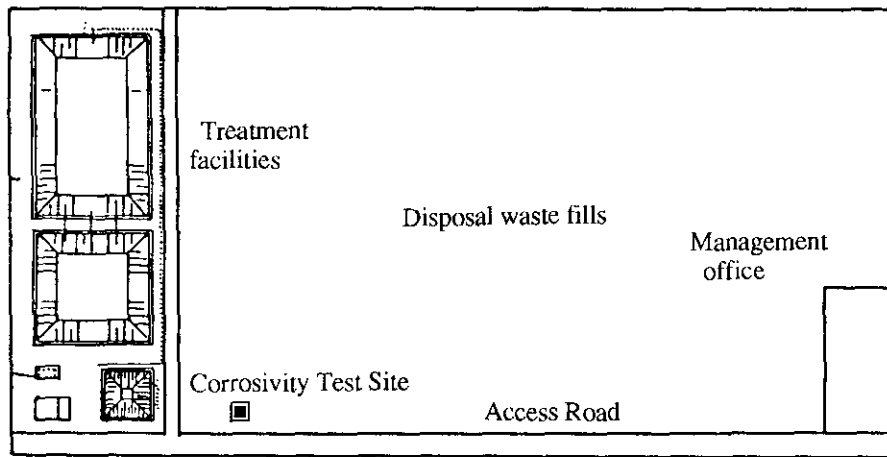
매립장소 선정 및 설치

부식시험용 시료의 매설장소로는 인천시청 산하 매립장을 선정하였으며 매립지 반중 지표근처에서 침출수가 유출되는 위치에 시료를 매설하였다. 매설위치의 평면도와 단면도는 그림 16에 나타난 바와 같다.

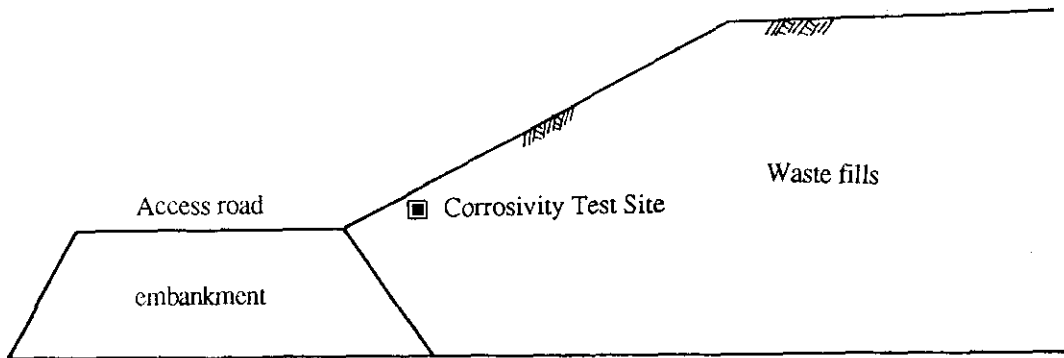
매설은 인력으로 지반을 굴착한 후 시료를 넣고 되메움하는 방식으로 하였으며 지반굴착시 침출수위는 지표하 20cm 정도에서 나타났다. 지반굴착 깊이는 약 120cm 정도로 하였으며 지표에서 지중으로 60cm까지는 복토재인 흙이고 그 이하부터 지중 120cm까지는 복토재와 쓰레기가 혼합된 지중으로 구성되어 있다. 시료배열의 평면도와 단면도를 그림 17에 나타내었는데 그림에서 보는 바와 같이 부식시료는 12개의 시료를 6개의 그룹으로 나누었으며 1개그룹당 시료는 종류별로 2개씩으로 하여 차후 시험시 평균 값을 취할 수 있도록 하였다.

시험방법

매설후 3개월 마다 캐어낸 시편을 다음과 같은 절차를 거쳐 부식속도를 측정하였다. 부식두께와 무게감량은 채취된 부식시편을 1차적으로 솔로 굽어낸 다음 끓는 10% NaOH 용액에 5분간 담근후 물로 씻고 아세톤으로 건조시킨 후에 측정하였다. 금속재료의 부식속도는 부식실험에서 얻은 무게 손실로부터 다음식에 의하여 구해진다. 구하여진 결과는 표 6의 NACE 기준과 비교하였다.

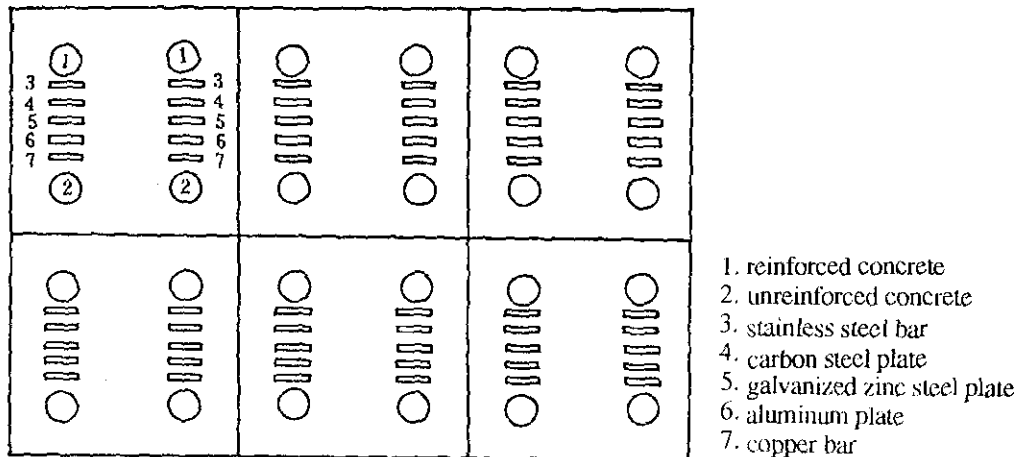


(a) plan

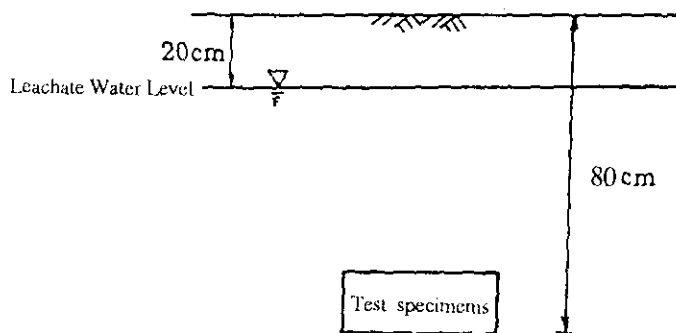


(b) profile

Fig 16. Locations of the buried specimens of in-situ corrosivity test



(a) plan



(b) profile

Fig. 17. Schematic view of the arrangement of specimens in the landfill

$$\text{부식속도} = 87.6 \frac{\omega}{D \cdot A \cdot T} \text{ (mm/yr)} \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 ω : 시편의 무게감량(mg): D: 시편의 밀도(g/cm³):
A: 시편의 표면적(cm²): T: 노출시간(hr)

Table 6. NACE standards(1976)

Thickness loss	Degree of corrosion
<0.03 mm/yr	Low
0.03~0.13 mm/yr	Moderate
0.13~0.25 mm/yr	Severe
> 0.25 mm/yr	Very severe

시험결과 및 고찰

1) 금속시편의 부식특성

현장부식실험 결과로부터 5종의 금속시편에 대한 매설기간별 중량감소분을 측정하고 이를 토대로 시간경과에 따른 매립재 종류별 매설시편들의 무게 감량과 부식속도를 계산한 결과를 그림 18에 보였다.

그림 18의 결과와 부식속도에 따른 부식정도를 평가한 NACE 기준(표 6)을 비교해 보면 알루미늄과 구리 및 스테인레스강 등은 매립재의 종류에 관계없이 매설 후 12 개월 경과시까지는 0.03 mm/year 이하의 매우 낮은 부식속도를 나타내어 부식이 거의 발생하지 않은 것으로 평가되었다. 탄소강이나 아연도강의 경우는 상기 재료보다 부식속도가 크며 부식정도는 중간정도에 해당되는 것으로 나타났다. 부식속도는 금속시편에 따라 상이하지만 7개월까지는 증가하나 그 이후는 감소하는 것으로 나타났는데 이는 시간이 경과함에 따라 실험편의 표면에 산화막이 형성되어 부식속도가 줄어들기 때문으로 사료된다. 총무게 감량은 부식경과 시간이 경과함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

2) 콘크리트 시편의 부식특성

현장에 매설된 무근 콘크리트시편과 철근 콘크리트시편에 대한 시간경과별 일축압축강도 및 무게 측정값은 표 7과 같다. 부식에 따른 콘크리트 시편의 일축 압축강도 변화량을 살펴보면 그림 19에서 보는 바와 같이 매설후 콘크리트 시편의 강도가 매설전 강도보다 오히려 크게 나타났다. 이러한 강도증가의 원인으로서는 일정한 온도와 습도 등이 유지되는 상태에서 장기간 동안 침출수내에 매설되어 있었기 때문에 콘크리트 자체의 경화작용이 발생했기 때문으로 사료된다. 따라서 단기간에 걸친 시험에서는 부식에 의한 강도감소보다 토층내에서의 자체 경화로 인한 강도증가 효과가 더 크게 발현된 것으로 보인다.

부식에 따른 콘크리트 시료의 무게감량을 살펴보면 그림 20에서 보는 바와 같이 부식경과 시간이 증가함에 따라 점차적으로 증가하며 이는 시편내의 수분의 양이 감소하면서 나타나는 현상으로 보여진다.

5. 결 론

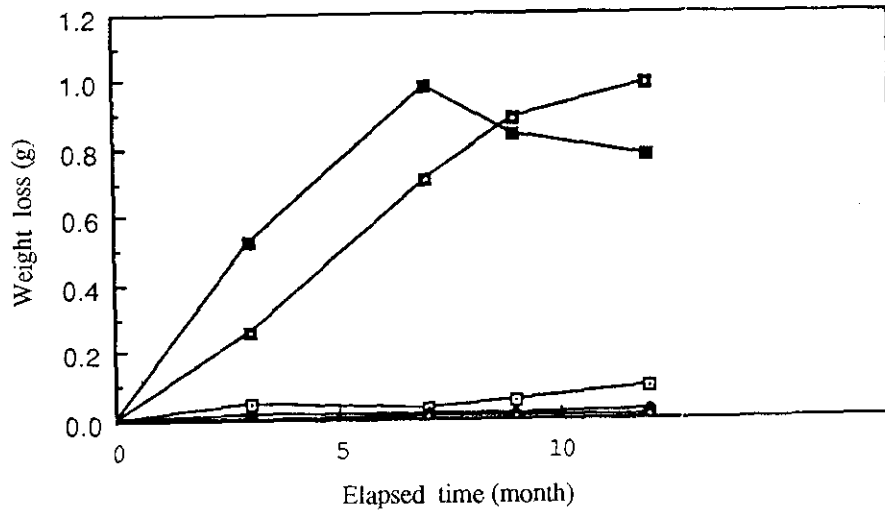
본 논문에서는 증가 추세에 있는 해안폐기물 매립지 조성의 지반환경적 측면에서의 타당성과 향후 부지 활용 측면에서의 지반특성을 알아보기 위하여 인천 소재의 중간규모의 쓰레기 매립장의 단면과 토질 투수특성을 이용하여 침출수의 이동성을 오염이동 수치해석 프로그램을 수행하여 검토하였다. 또한 그 매립장을 구성하는 북토재, 주변화강토, 바닥 점토 및 현장쓰레기를 채취하여 실내 전기저항시험 그리고 현장에 직접 시편을 묻은 후 3 개월 단위로 시편을 채취 부식된 정도를 조사하는 시험을 실시하였다.

오염물질의 이동 해석에서는 흙의 비균질성과 매립지내의 지하수위면의 불확실성에 따라 발생하는 기초지반을 통한 침출수 이동특성을 알아보았다. 침출수의 특성상 지반내 투수계수가 큰 지층이 존재하면 이를 통하여 오염물질이 이동하는 속도는 넓은 범위에 걸쳐 투수계수가 균질하게 큰 경우보다 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 비균질하여 투수계수가 큰 지층으로의 오염수 이동을 방지하기 위하여 제방 하부의 차수막을 연장하는 방법과 매립물 하부의 유공관의 기능을 강화시켜 오염물질이 라이너 지반으로 스며드는 것을 조기 차단하여 매립물과 라이너 내부의 비포화 상태를 지속시키는 방법이 강구되어야 할 것이다.

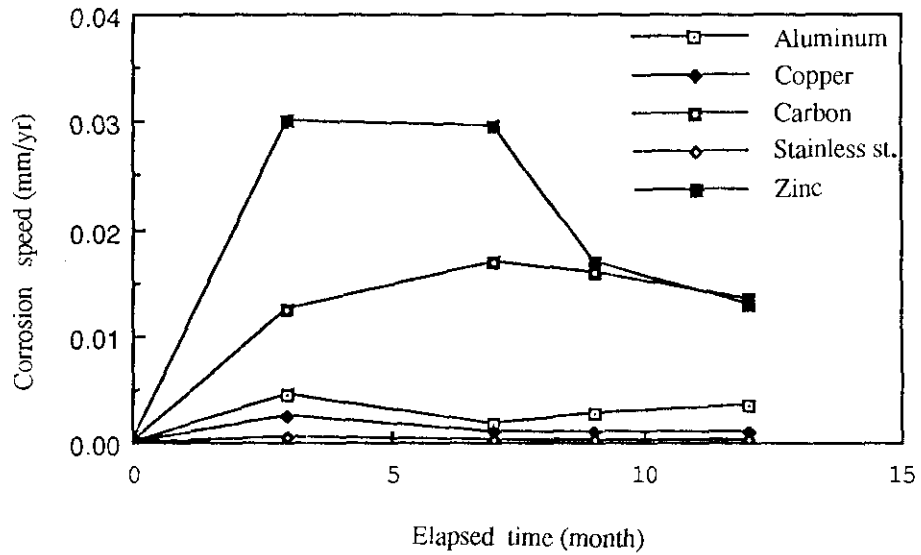
쓰레기 매립지의 건설자재에 대한 부식성 실험중 실내저항 시험의 경우는 중류수에 의하여 포화된 복토재를 제외하고는 전기저항치가 매우 낮아 흙의 비균질성이나 매립물의 전기화학적인 영향에 의한 부식가능성이 큰 것으로 나타났으며 특히 침출수에 접촉된 토질의 전기저항치가 낮은 것을 알 수 있었다. 그러나 현장 금속시편 매설시험에 의한 결과에 의하면 회생시편으로 사용되는 아연 및 탄소강판 만이 부식이 조금 크게 나타났으며, 시간이 지남에 따라 부식량은 증가하나 부식속도는 감소하는 것으로 나타났다. 본 시험으로부터 전기저항치 측정은 부식포텐셜을 판별하는 주요 요소이기는 하지만 매립지내의 정확한 부식 포텐셜 판단을 위해서는 보다 포괄적인 여러 요소의 검토가 필요한 것을 알 수 있으며 현장 매설 시험 또한 보다 장기간에 걸친 매설 후 강도 및 무게감량을 측정하여 그 변화 추이를 검토함이 요망된다.

참고문헌

1. Jang, Y.S, N.Sitar & A. Der Kirreghian, Reliability Approach to Probabilistic Modelling of Contaminant Transport, Report No. UCB/GT-90/03, Dept. of Civil Eng., Univ. of Calif., Berkeley, July, 1990.
2. Goodal, D.C., & R.M. Quigley, Canadian Geotechnical Journal, Vol.14, No.2, 1977, pp.223-236.
3. Lee, H-D, "Corrosion Control in water pipes", Ph.D. thesis, Han Yang University, Seoul, Korea, July, 1991. pp.32.
4. NACE, Preparation and installation of corrosion coupons and interpretation of test data in oil production practice, NACE, Std., RR-07-75, 1976.
5. Uhlig, H.H & R.W. Revie, Corrosion and corrosion control, John Wiley and Sons, 1985, pp.180-181.



a) Weight loss



b) Speed of corrosion

Fig 18. Weight loss and the speed of corrosion versus time for the metal specimens

Table 7. Changes of the uniaxial strength of the concrete specimens

☐ unreinforced concrete

Specimen No.	Size (mm)(dxH)	before burial		after burial			comparison
		weight (g)	uniaxial strength (kg/cm ²)	duration of burial (month)	weight (g)	uniaxial strength (kg/cm ²)	weight loss (g)
1	100.8x203.6	3769.4	107.6	3	3765.0	88.20	4.4
2	100.1x201.6	3883.0			3880.0	115.20	2.0
3	101.2x200.5	3772.8	107.6	7	3764.0	110.83	8.8
4	101.2x195.0	3741.7			3731.0	121.91	10.7
5	101.2x200.5	3697.4	107.6	9	3686.1	119.70	11.3
6	101.5x201.6	3775.3			3764.4	140.10	10.9
7	102.2x200.5	3742.3	107.6	12	3732.2	142.68	10.1
8	101.3x200.5	3737.8			3723.5	110.06	14.2

☐ reinforced concrete

Specimen No.	Size (mm)(dxH)	before burial		after burial			comparison
		weight (g)	uniaxial strength (kg/cm ²)	duration of burial (month)	weight (g)	uniaxial strength (kg/cm ²)	weight loss (g)
1	101.5x202.9	3745.2	136.6	3	3843.0	115.40	2.2
2	101.0x201.1	3820.5			3809.0	126.00	11.5
3	101.5x200.3	3834.5	136.6	7	3823.0	156.05	11.5
4	100.9x195.3	3845.0			3835.0	168.15	10.0
5	101.4x200.3	3819.5	136.6	9	3809.3	160.00	10.2
6	101.0x201.2	3868.2			3855.9	150.30	12.3
7	101.3x200.2	3804.6	136.6	12	3789.1	171.97	15.5
8	101.2x201.5	3758.7			3745.5	183.44	13.2

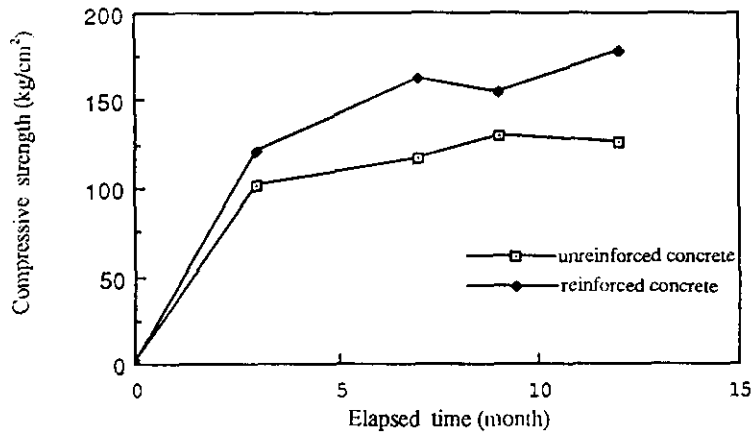


Fig. 19 Variation of axial compressive strength versus time for the concrete specimens

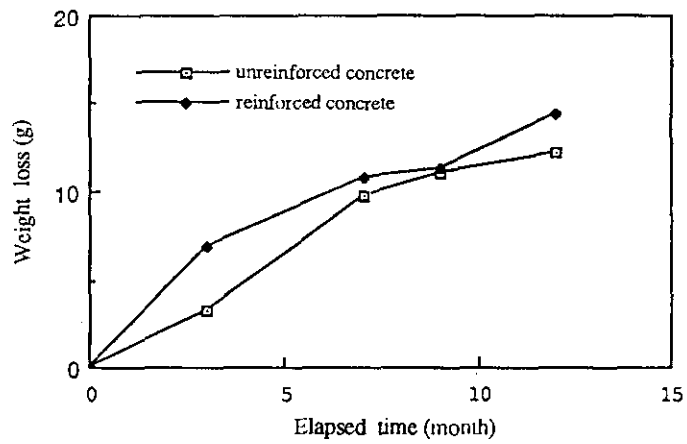


Fig. 20 Weight loss versus time for the concrete specimens